北部湾大风江口互花米草湿地有机碳储量的分布特征

黄星[1]，梁绍信[2]，陶玉华[1*]，王薛平[1]，段轶涛[2]

（1. 广西北部湾海洋灾害研究重点实验室，北部湾大学，广西 钦州 535011；2. 广西北部湾海岸科学与工程实验室，北部湾大学，广西 钦州 535011）

摘 要：互花米草被引入我国滨海地区后，经过多年的生长与演替，改变了潮间带原有生态系统的碳储量，但影响机制仍有待深入研究。为进一步探讨互花米草入侵后潮滩有机碳储量演变特征，本研究以广西北部湾大风江口入侵约 6 a 的互花米草湿地为研究对象，分析了 2018 年 8 月、11 月及 2019 年 1 月、3 月采集的样品中有机碳及相关理化指标。结果显示，互花米草植物年均地上碳储量为 9.68 $t·hm^{-2}$，高于地下根系的 5.56 $t·hm^{-2}$；互花米草入侵湿地土壤碳储量显著高于互花米草植物本身，且不同季节中春季土壤碳储量显著高于其他季节；土壤的 C/N 比值范围为 3.53～9.67，表明互花米草入侵群落有机碳受海源的潮汐输入影响较大；互花米草生态系统总碳储量与土壤碳储量之间呈极显著正相关关系，且季节性变化规律一致；随着入侵时间的延长，互花米草生态系统中有机碳储量呈逐渐增加的趋势，表明互花米草入侵提高了光滩的有机碳储量，并能提高光滩的固碳能力。该文可为科学评价互花米草入侵对光滩碳储量的影响提供参考。

关键词：北部湾，互花米草，有机碳储量，有机碳含量，分布特征

Distribution characteristics of organic carbon stocks of *Spartina alterniflora* in Dafeng River Estuary, Beibu Gulf

HUANG Xing[1], LIANG Shaoxin[2], TAO Yuhua[1*], WANG Xueping[1], DUAN Yitao[1]

（1. *Guangxi Key Laboratory of Marine Disaster in the Beibu Gulf, Beibu Gulf University*, Qinzhou 535011 Guangxi, China; 2. *Key Laboratory of Coastal Science and Engineering, Beibu Gulf, Beibu Gulf University*, Qinzhou 535011 Guangxi, China）

Abstract: After *Spartina alterniflora* was introduced into coastal areas in China, the carbon storage of the original ecosystem was changed after years of growth and succession in the intertidal zone, but the influence mechanism remains to be further studied. In order to further explore the evolution characteristics of organic carbon storage in tidal flat due to *S. alterniflora* invasion, this study took *S. alterniflora* wetland in Guangxi Beibu Gulf for about 6 years as the research object, and analyzed the organic carbon and related physical and chemical indexes of

收稿日期：2021-03-11

基金项目：国家自然科学基金项目(31960251;41901226;41907320)；广西北部湾海洋灾害研究重点实验室自主项目(2018TS01）[Supported by the National Natural Science of Foundation (31960251;41901226; 41907320); Guangxi Key Laboratory of Marine Disaster in the Beibu Gulf (2018TS01)]。

作者简介：黄星（1986-），博士，主要从事滨海湿地景观生态演变及过程研究，(E-mail)hx_wxp@163.com。

通信作者：陶玉华，博士，教授，从事生态学研究, (E-mail)151782653@qq.com。

samples collected in August, November 2018 and January, March 2019. The results showed that the average annual aboveground carbon storage of *S. alterniflora* was 9.68 t·hm^{-2}, which was higher than that of underground roots (5.56 t·hm^{-2}). The soil carbon storage of *S. alterniflora* invasion was significantly higher than that of *S. alterniflora* plant itself, and the soil carbon storage in spring was significantly higher than that in other seasons. The C / N ratio of soil ranged from 3.53 to 9.67, indicating that the organic carbon of *S. alterniflora* invasion community was greatly affected by tidal input of sea source. The total carbon storage of *S. alterniflora* ecosystem was significantly positively correlated with soil carbon storage, and the seasonal variation was consistent. With the extension of invasion time, the organic carbon storage in *S. alterniflora* ecosystem showed a gradually increasing trend, indicating that the invasion of *S. alterniflora* increased the organic carbon storage and improved the carbon sequestration capacity in bare flat. This study provides reference for the scientific evaluation of the impact of *S. alterniflora* invasion on carbon storage in bare flat.

Key Words: Beibu Gulf; *Spartina alterniflora*; soil organic carbon; organic carbon content; distribution Characteristics

滨海盐沼位于海洋和陆地之间的过渡区域，不仅具有促淤固土和保滩护岸的作用，而且可以通过光合作用将大气中的 CO_2 合成有机物质，使之进入生态系统成为蓝碳的重要组成部分。盐沼植被对湿地碳库的形成具有重要的意义，改变了湿地的固碳速率（金宝石等，2016），盐沼植被碳汇与全球气候变化的响应成为当前研究的热点内容。

互花米草（*Spartina alterniflora*）是禾本科米草属多年生的盐沼植物，目前已广泛分布于我国东南沿海。由于其具有一定的积淤造陆、绿化沙滩和防风拒浪的功效(赵相健等，2017；王方怡等，2020)，我国于 1979 年从美国北卡罗来纳 Morehead City、乔治亚的 Sapelo Island 和弗罗里达的 Tampa Bay 引种了互花米草（陈建群等，1990）。因其具有极强的繁殖能力，引进后便快速扩张，破坏了当地生物群落的栖息地，影响滩涂养殖业（赵美霞等，2012，童晓雨等，2020）。互花米草净光合作用速率高并具有较大的生物量，加上滩涂土壤的呼吸速率又较低，通过互花米草植物体和土壤表面释放的碳量较少，其固碳作用比较明显（于彩芬等，2014）。

目前对互花米草的研究主要集中在入侵机制、治理和入侵对环境的影响（栾兆擎等，2020；谢宝华&韩广轩，2018），以及互花米草入侵后滩涂地的理化因子、微生物群落、浮游生物和重金属的变化研究（沈永明等，2013；李想&刘茂松等，2020；谢蓉蓉等，2020；伊晓雷等，2020），亦有从宏观角度研究互花米草入侵后的景观特征的变化（韩爽等，2020），且大多数研究主要集中在江苏、福建和广东等地的互花米草分布区域（童晓雨等，2019；左雪燕等，2019；徐耀文等，2020），而对于广西滩涂湿地互花米草碳储量的研究较少，不利于规律性成果的总结和盐沼植物碳汇清单的完善。广西自 1979 年首次在北部湾湿地引种了互花米草，分布面积不断扩大，已达 686.48 hm^2（潘良浩等，2016），其入侵已对潮间带生态系统产生了一定的影响。

对于北部湾互花米草入侵湿地有机碳的时空变化特征及来源分析目前还缺乏深入的研究，故此本文通过追踪北部湾互花米草湿地土壤有机碳 4 个季节的变化情况，阐释了互花米草生态系统碳储量的季节和空间的分布特征，分析了影响其碳库变化的主要因素及来源追溯，以期为研究湿地的碳循环和增汇减排提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

广西北部湾海域位于北部湾北部，在 20°58′—22°50′ N、107°29′—110°20′ E 之间，海岸线长 1 628.59 km，区域面积 2.0361 万 km^2，属热带和亚热带季风气候，海面年均气温 20 ℃ ~30 ℃，年均水温 24.5 ℃。大风江口海域是广西北部湾主要的入海河流之一，属独流入海河流，全长 185 km（姜宁等，2019）。近些年在大风江口逐渐发现互花米草草斑的分布，本研究以大风江口入侵约 6 a 的互花米草为研究对象，通过样方调查测定了样地基本属性，详见表 1。

表 1　样地属性

Table 1　Sample properties

种类 Species	平均株高 Average height (m)	密度 Density (plant·m^{-2})	生物量 Biomass(t·hm^{-2})
互花米草 (*Spartina alterniflora*)	0.92	473	21.42

1.2 样品的采集

分别于夏（2018 年 8 月）、秋（2018 年 11 月）、冬（2019 年 1 月）、次年春（2019 年 3 月）4 个季节在北部湾大风江口互花米草群落进行了土壤与植株采样。于图 1 所示斑块分别设立 6 个 1 m × 1 m 的样方（图 1），将样方内植物地上部分齐地面刈割，挖掘地下根系，冲洗去掉杂质后用聚乙烯密封袋分别盛装带回实验室，称取其鲜重和烘干至恒重后的干重。在样方内随机设立 3 个土壤采样点，用土壤采样器采集 0~40 cm 的土柱，土样按照 0~20 cm、20~40 cm 分 2 层进行采样，分别装入对应编号的聚乙烯密封袋中带回实验室，于室内阴凉通风处自行干燥，干燥后称重。

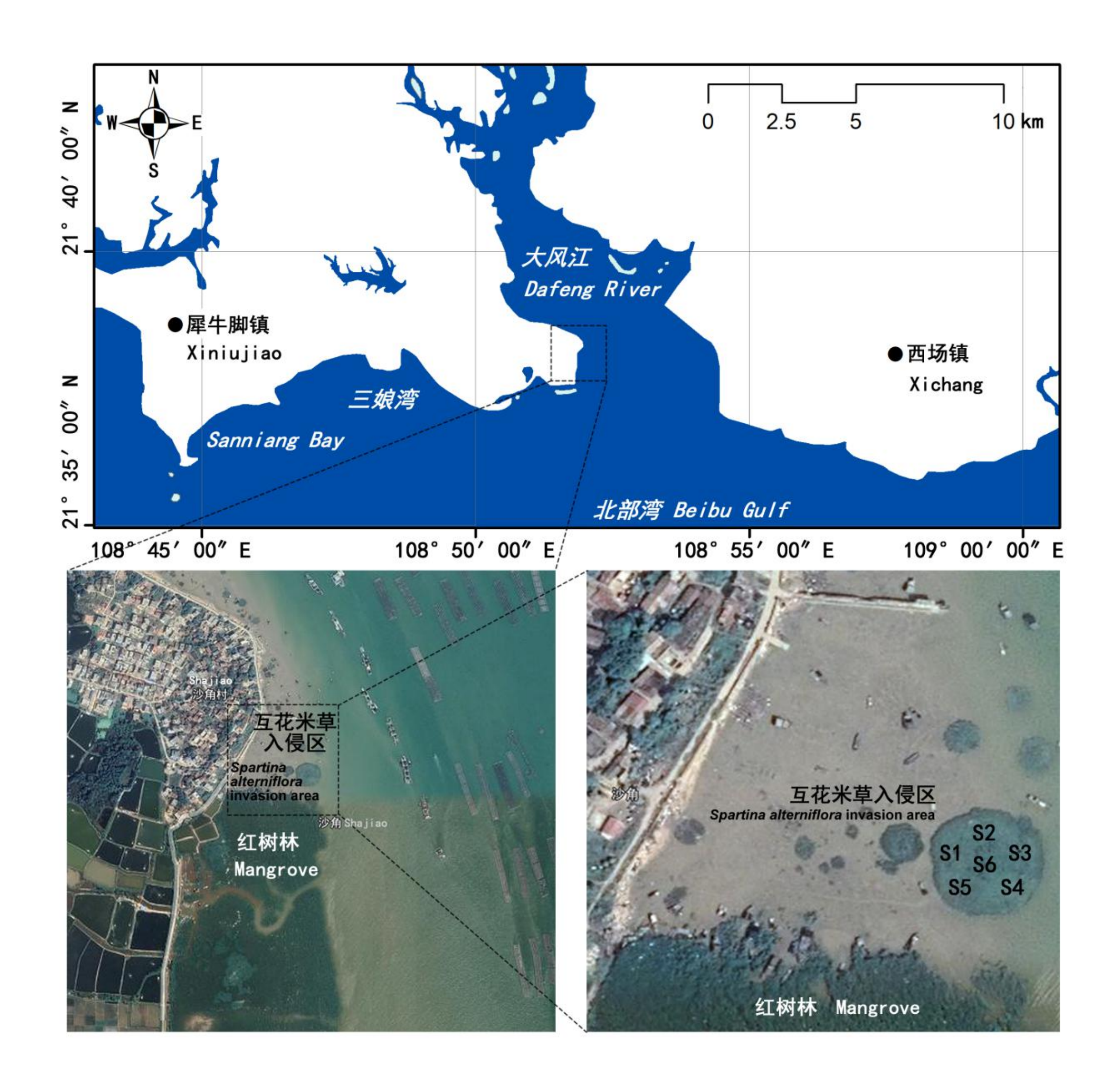


图 1　北部湾大风江口研究区与采样点示意图

Fig.1　Sample sites in Dafeng River Estuary, Beibu Gulf

1.3 样品的测定

采用重铬酸钾-外加热氧化法测定互花米草植物体的有机碳含量和土壤的有机碳含量。土壤全氮含量采用凯氏定氮法测定。

1.4 碳储量的计算

土壤容重：

$rs = g \times 100/v \times (100 + W)$　（1）

式中，*rs* 为土壤容重（$g{\cdot}cm^{-3}$），*g* 为环刀土鲜重（g），*v* 为环刀容积（100 cm³），*W* 为样品含水率（%）。

土壤碳储量：

$SOC = \sum_i^n Ci \times Di \times Ei \times 0.1$　（2）　（孙凡等，2017）

式中，SOC 为一定深度内土壤碳储量($t{\cdot}hm^{-2}$)，*Ci* 为第 *i* 层有机碳含量（$g{\cdot}kg^{-1}$），*Di* 为第 *i* 层土壤容重（$g{\cdot}cm^{-3}$），*Ei* 为第 *i* 层土层厚度（cm）。

植物碳储量：

$$植物碳储量 = 植被单位面积生物量 \times 植物有机碳含量$$　（3）

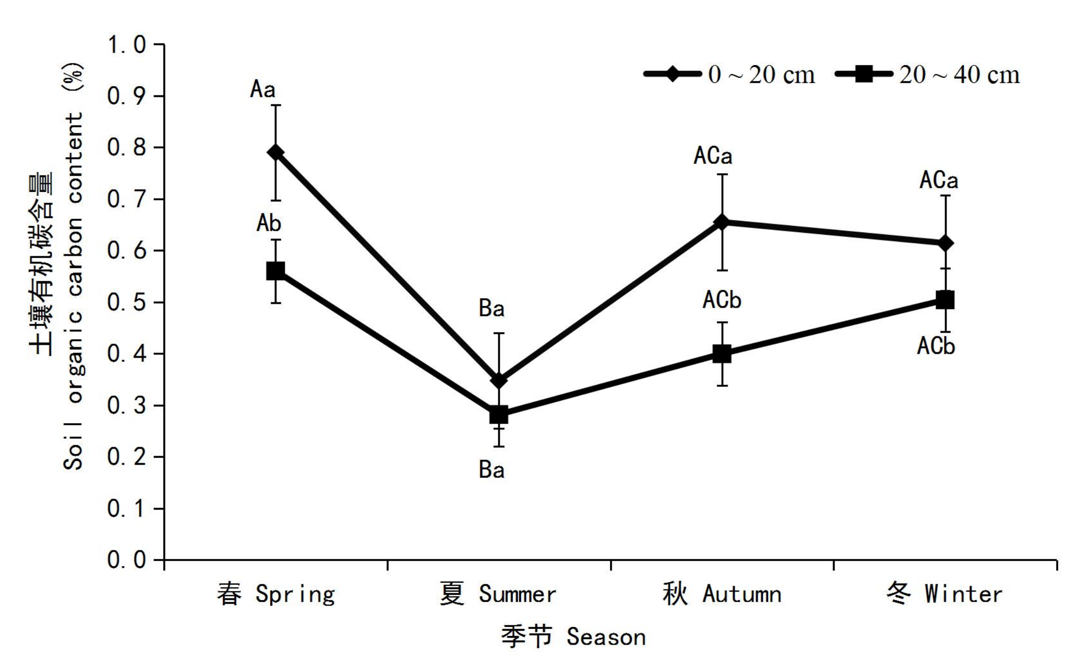
1.5 数据处理及统计分析

数据的处理及统计分析采用 Microsoft Excel 2010 与 SPSS22.0 统计软件进行，利用 One-way ANOVA 对植物群落地上、地下碳储量和土壤碳储量的变化进行差异性分析（显著性水平$\alpha = 0.05$），利用 Pearson 相关分析法分析各指标间的相关关系（显著性水平$\alpha = 0.05$）。

2 结果与分析

2.1 互花米草土壤有机碳含量的变化

互花米草 0～20 cm 土层有机碳含量大于 20～40 cm 土层（图 2），表现为随着土层深度的增加而减小的趋势。0～20 cm 和 20～40 cm 土层的土壤有机碳含量的季节变化均表现为春季最大，夏季最小，从夏季到次年春季大体表现为随着月份的增加而增大的趋势。2 个土层的有机碳含量除了夏季外，春季、秋季和冬季之间具有显著性差异。0～20 cm 和 20～40 cm 土层有机碳含量只在秋季表现出显著性差异。此外 ，不同样点间 0～20 cm 土层秋季有机碳含量变化最大，其变异系数（CV）为 0.39。而在 20～40 cm 土层，春季有机碳含量变化的 CV 最大，为 0.19。



不同大写字母表示在不同季节同一土层差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一季节不同土层差异显著（$P < 0.05$）。The significant difference between organic carbon in soils of same depth from different seasons was displayed by using different capital letters, while the significant difference between organic carbon in soils of different depth from same season was displayed by using different small letters.

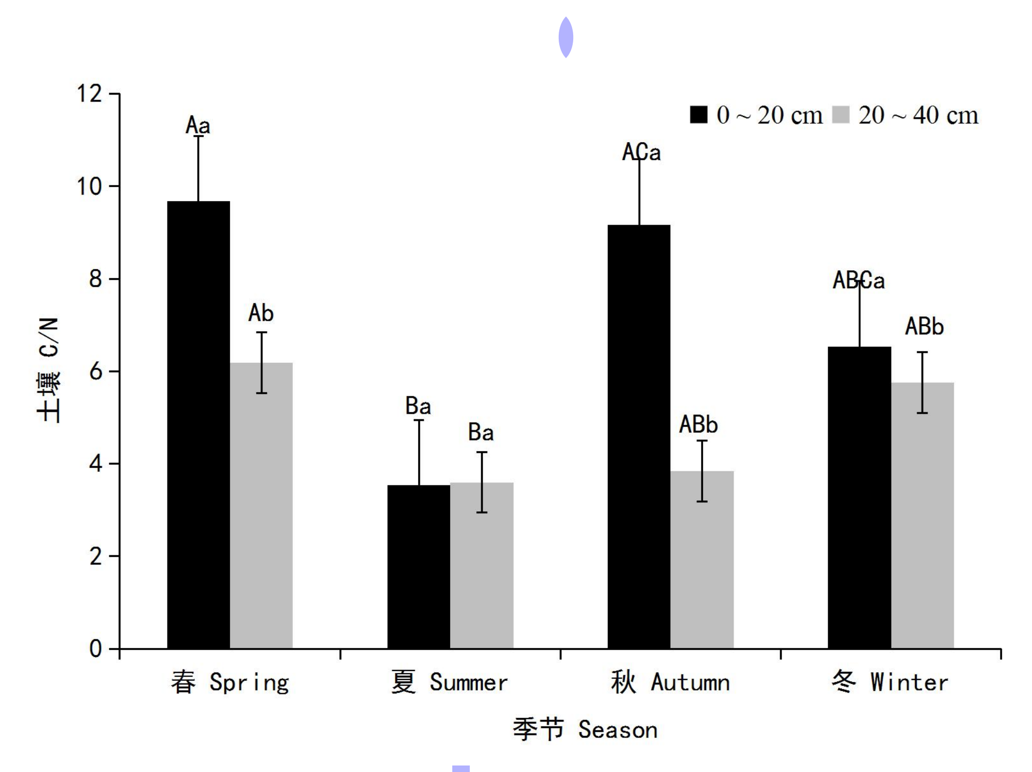
图 2　互花米草土壤有机碳含量的季节变化

Fig. 2　Seasonal distributions of organic carbon content in different soil depth of *Spartina alterniflora*

2.2 互花米草土壤 C/N 比值的变化

在 0～40 cm 土层的范围内，互花米草在 4 个季节的 C/N 比值为 3.53～9.67（图 4），除了夏季外，互花米草土壤 C/N 均表现为 0～20 cm 土层高于 20～40 cm 土层，最大值均出现在春季，最小值出现在夏季。除了夏季外，其他 3 个季节的 0～20 cm 和 20～40 cm 土层之间的 C/N 比值均存在显著性差异。0～20 cm 土层中，夏季土壤 C/N 比值分别与春季和秋季

存在显著性差异，20～40 cm 土层中，夏季与春季的 C/N 比值差异性显著（$P<0.05$）。此外，在 0～20 cm 土层，秋季 C/N 比值 CV 最高，为 0.33。而在 20～40 cm 土层，春季的 C/N 比值 CV 最大，为 0.19。



不同大写字母表示在不同季节同一土层差异显著（$P<0.05$），不同小写字母表示同一季节不同土层差异显著（$P<0.05$）。

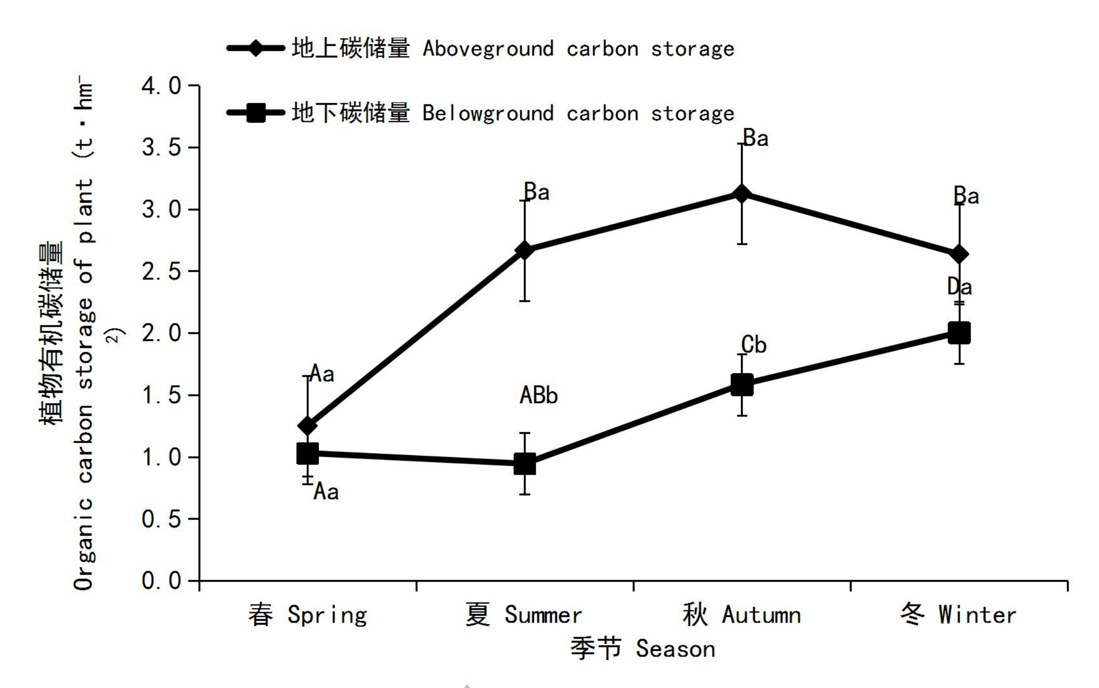
The significant difference between C/N in soils of same depth from different seasons was displayed by using different capital letters, while the significant difference between C/N in soils of different depth from same season was displayed by using different small letters.

图 3　互花米草土壤 C/N 比值

Fig. 3　Seasonal distributions of Soil C/N variation of *Spartina alterniflora*

2.3 互花米草植物有机碳储量的变化

互花米草不同季节的植物地上和地下碳储量存在明显的季节变化（图 4），表现为互花米草同一个季节的地上碳储量(1.25～3.12 t·hm^{-2})均比地下碳储量（0.94～2.00 t·hm^{-2}）高。互花米草地上碳储量的变化规律为秋季 ＞ 夏季 ＞ 冬季 ＞ 春季，春季与其他 3 个季节均存在显著性差异，且春季不同样点间地上碳储量 CV 最大（0.83）。互花米草地下碳储量的变化规律为冬季 ＞ 秋季 ＞ 春季 ＞ 夏季，春夏季均与秋冬两季存在显著性差异性，且春季不同样点间地下碳储量 CV 最大（1.16）。在夏季和秋季，互花米草地上和地下碳储量间存在显著性差异。



不同大写字母表示在不同季节同一部位差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一季节不同部位差异显著（$p < 0.05$）。

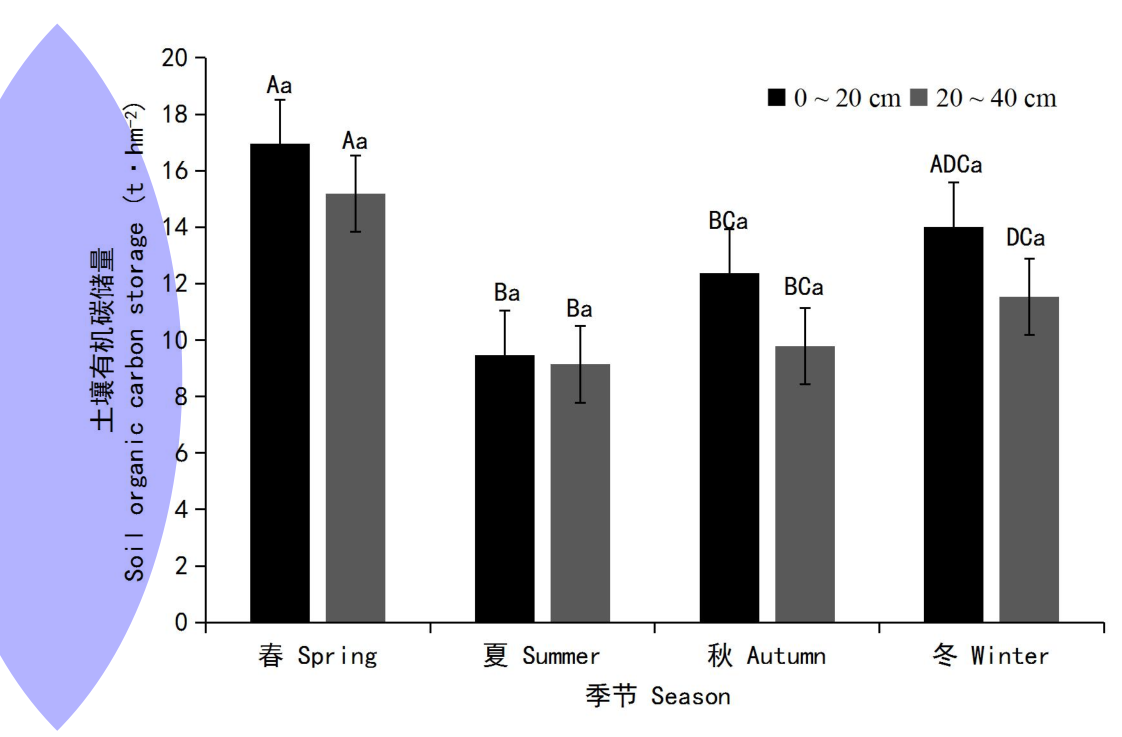
The significant difference between organic carbon storage in soils of same source from different seasons was displayed by using different capital letters, while the significant difference between organic carbon storage in soils of different sources from same season was displayed by using different small letters.

图 4　互花米草植物地上和地下碳储量的变化

Fig. 4　Seasonal distributions of overground and underground organic carbon storage of *Spartina alterniflora*

2.4 互花米草土壤有机碳碳储量的分配

互花米草土壤碳储量均表现为表聚性，即 4 个季节的 0～20 cm 土层的碳储量均高于 20～40 cm 的土层（图 5），在各季节中表现为差异性不显著。在 0～20 cm 和 20～40 cm 土层中，春季的碳储量分别与夏季和秋季具有显著性差异，夏季和冬季差异性显著。20～40 cm 土层的碳储量春季与冬季存在显著性差异。互花米草夏季的土壤碳储量在两个土层中的变化差异最小。2 个土层的碳储量的最大值均出现在春季，其次是冬季和秋季，夏季均表现为最低。互花米草 0～40 cm 土壤总碳储量为次年春季（32.14 t·hm^{-2}）> 冬季（25.55 t·hm^{-2}）> 秋季（22.16 t·hm^{-2}）> 夏季（18.62 t·hm^{-2}），表现为随夏季到次年春季的时间推移而逐渐增加的趋势。此外，在同一季节的不同样点间，0～20 cm 土层互花米草土壤秋季碳储量的 CV 最高（0.33），而在 20～40 cm 土层则表现为春季碳储量的 CV 最大（0.21）。



不同大写字母表示在不同季节同一土层差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一季节不同土层差异显著（$P < 0.05$）。

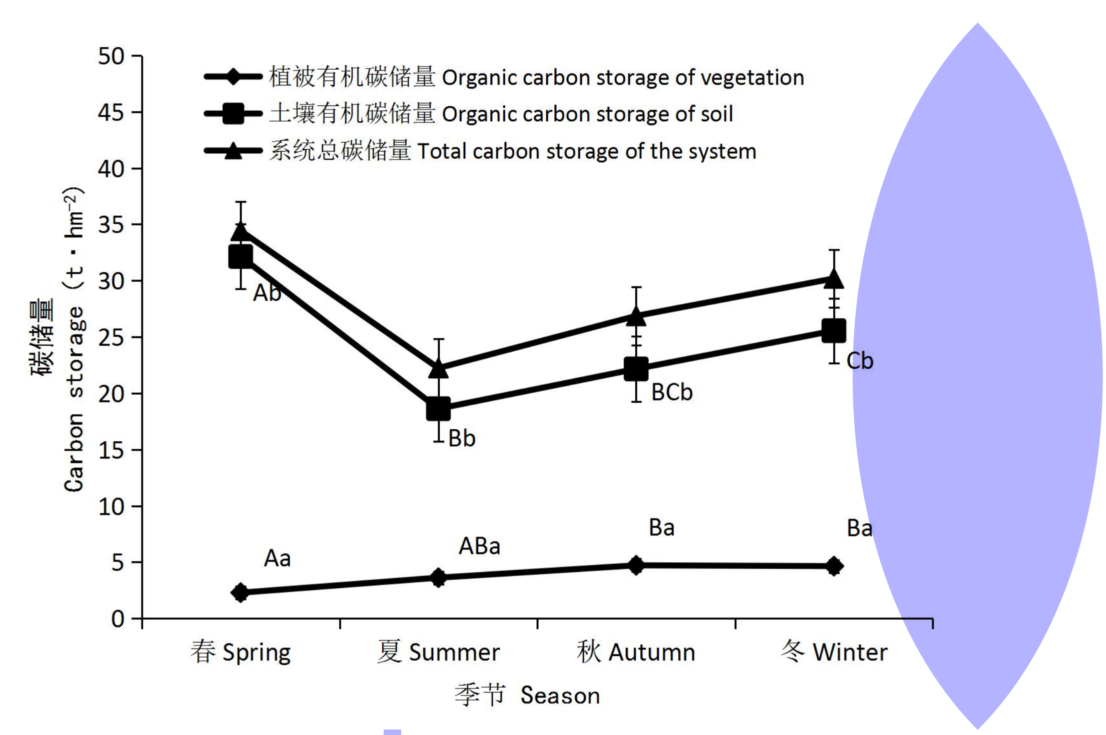
The significant difference between soil organic carbon storage in same depth from different seasons was displayed by using different capital letters, while the significant difference between soil organic carbon storage in different depth from same season was displayed by using different small letters.

图 5　不同土层互花米草土壤碳储量的季节变化

Fig. 5　Seasonal distributions of soil organic carbon storage in different soil depth of *Spartina alterniflora*

2.5 互花米草生态系统碳储量的分配

互花米草土壤碳储量显著高于植物体本身碳储量（图 6），二者在 4 个季节均表现为显著性差异（$P < 0.05$）。互花米草土壤碳储量表现为春季（32.14 t·hm^{-2}）> 冬季（25.55 t·hm^{-2}）> 秋季（22.16 t·hm^{-2}）> 夏季（18.62 t·hm^{-2}），春季土壤碳储量分别与夏季、秋季和冬季碳储量具有显著性差异，夏季与冬季差异性显著。 植物本身有机碳储量由大到小的顺序为秋季、冬季、夏季、春季，春季互花米草植物有机碳碳储量分别与秋季和冬季存在显著性差异（$P < 0.05$）。互花米草生态系统总碳储量中，春季最大（34.42 t·hm^{-2}），其次大小顺序为冬季（30.19 t·hm^{-2}）、秋季（26.86 t·hm^{-2}）和夏季（22.23 t·hm^{-2}），且春季不同样点间总碳储量 CV 最大（0.22）。互花米草系统总碳储量的季节变化与土壤碳储量之间存在极显著的正相关关系（$P < 0.01$，$R = 0.9688$）。由于采样过程中，因受潮汐影响枯落物的现存量较少，所以将其一并归入植物的碳储量计算，故整个互花米草生态系统有机碳储量只包含植物与土壤 2 个部分。



不同大写字母表示在不同季节同一部位差异显著（$P < 0.05$），不同小写字母表示同一季节不同部位差异显著（$P < 0.05$）。

The significant difference between organic carbon storage in same median from different seasons was displayed by using different capital letters, while the significant difference between carbon storage in different median from same season was displayed by using different small letters.

图 6　互花米草植被、土壤碳储量的季节变化

Fig.6　Seasonal distributions of organic carbon storage in plants and soils of *Spartina alterniflora*

3 讨论

3.1 互花米草土壤 C/N 比值变化及来源分析

C/N 比值常用来作为确定湿地土壤有机质来源的一种方法，通常陆源有机质的 C/N 比值大于 10，而海源有机质的 C/N 比值小于 10（Krishnamurthy et al., 1986；Cifuentes et al., 1996）。本研究中互花米草土壤 4 个季节 C/N 比值为 3.53～9.67，均值为 7.23，均小于 10，表现为海源来源，与王丹等（2015）在崇明东滩通过同位素追踪互花米草有机碳来源的研究结果一致。互花米草的入侵为光滩带来有机碳的输入，入侵早期湿地有机碳主要来自潮汐输入，以植物体促淤作用而固定累积有机碳为主，随着入侵时间的延长，来自其植物本身的固碳作用增强而海源有机碳比例逐渐减少（王丹等，2015）。在本研究中，大风江口互花米草入侵约 6 年后，春季和秋季采集的土壤样品中 C/N 比值已接近 10，反映出海源有机碳比重在降低，而互花米草的固碳作用在逐渐显现。

3.2 互花米草有机碳储量和含量的季节变化

北部湾大风江口互花米草植物地上部分的平均碳储量高于地下根系的碳储量，源于地上平均生物量（12.35 t·hm^{-2}）高于地下根系的生物量（9.07 t·hm^{-2}），互花米草夏季气温高生长快，随着时间的推移，地上生物量持续增长，冬季后逐渐下降，到次年春季地上生物量降至最低，春季随气温的逐渐升高，萌发的新植株快速生长，地上生物量又开始增加（冯振兴等，2015）。随着气温下降，互花米草的营养物质逐渐由地上转移到地下，使其根系的生物量和碳储量最大值出现在冬季，与广西北部湾盐沼植物茳芏的生物量季节变化的研究结果相近（潘良浩等，2011），这也是多年生湿地草本植物对气候和环境的适应特性。本研究互花米草地上和地下生物量和碳储量与江苏黄河口互花米草生物量变化略有不同（钦佩等，

1992），因北部湾与江苏气候有差别，互花米草生长季节不同，但季节顺延推移的总体变化趋势是一致的。

北部湾大风江口互花米草土壤有机碳含量和储量均表现为春冬季高而夏季低，与苏北互花米草湿地研究结果一致（高建华等，2007）。4 个季节的 0～20 cm 和 20～40 cm 土层的碳储量的最小值均出现在夏季，这可能是由于夏季温度高，土壤呼吸速率加大，加速了土壤有机碳的分解，不利于有机碳的积累。土壤碳储量的季节变化表现为从夏、秋、冬到春季随着时间的推移而递增，与崇明东滩互花米草土壤有机碳储量的季节变化规律相似（陈怀璞等，2017）。这进一步表明互花米草对光滩的沉积和营养物质的埋藏具有控制作用，无论是早期来自海源为主的有机碳还是多年后以陆源为主的有机碳均可表现出特定的时间累积效应（高建华等，2007）。

本研究中，互花米草入侵光滩约 6 年时间，其 0～20 cm 土壤有机碳平均含量（6.02 $g\cdot kg^{-1}$），高于王港河口互花米草入侵 4 年的湿地(4.11 $g\cdot kg^{-1}$)（Zhou et al., 2008），低于江苏盐城新洋港、射阳县等地入侵 12～16 a 的湿地（6.35～12.97 $g\cdot kg^{-1}$）（王刚等，2013；Xiang et al., 2015），说明互花米草入侵光滩后潮滩湿地表层土壤有机碳含量会随着时间而累积，互花米草有效地提高了光滩有机碳含量，增强了湿地的碳汇能力（王刚等，2013；许鑫等，2014）。

3.3 互花米草土壤有机碳储量和含量的垂直分布

大风江口互花米草 4 个季节土壤碳储量和含量均表现为表聚性现象，即表层高于下层，与珠海淇澳岛（徐耀文等，2020）、江苏王港（冯振兴等，2016）的相关研究结果一致，但与闽江河口互花米草湿地有所差异（潘婷等，2015）。滨海盐沼湿地土壤有机碳储量和含量空间分布特征与其裸滩湿地特性有关，淤涨型湿地的表层土壤的有机碳随时间而累积，使得土壤中有机碳储量表现出随着时间而逐渐增加的趋势（陈怀璞等，2017）。而有些地区处于悬沙扩散冲淤区，径流作用弱，受潮汐影响其表层有机质发生搬离现象而使表层土壤有机碳低于深层，闽江河口互花米草湿地属于此种情况（窦亚伟&林敏基，1991；潘婷等，2015）。

互花米草土壤有机碳的含量表现出的表聚性现象主要与其海源性有机质积累于表层土壤有关，互花米草植被的促淤造土作用，截留了海源有机质并埋藏在表层土中，和入侵较长时间的互花米草土壤有机碳来源情况不同，较多研究报导了后者表层土壤有机碳主要来源于其枯落物而深层土壤有机碳来源于根系，互花米草随着入侵时间的延续，来自海源和陆源的有机碳比例会发生变化（Yang et al., 2015；陶玉华，2020）。

互花米草的生态效应具有两面性，虽然互花米草在滨海湿地极易形成单优种群改变了本土物种的栖息地并改变河口水沙格局，但另一方面互花米草对促淤造陆和固碳增汇方面又表现出一定的正面生态效应。

结论

（1）大风江口互花米草植物地上平均碳储量显著高于地下根系碳储量，土壤碳储量显著高于植物自身。

（2）春季互花米草土壤碳储量最高，其次分别为冬季、秋季、夏季，且春季土壤碳储量与其他 3 个季节差异显著。

（3）土壤 C/N 比值表明大风江口互花米草湿地有机碳主要来源于海源的潮汐输入。互花米草不同季节的总碳储量与土壤碳储量之间存在极显著正相关关系，说明随着互花米草入侵时间的推移入侵地土壤有机碳将逐渐增加，互花米草对光滩的固碳作用明显。

参考文献：

CHEN HP, ZHANG TY, GE ZM, et al., 2017. Distribution of soil carbon and nitrogen stocks in salt marsh wetland in Dongtan of Chongming[J]. J Ecol Rural Environ, 33(3): 242-251. [陈怀

璞，张天雨，葛振鸣,等, 2017. 崇明东滩盐沼湿地土壤碳氮储量分布特征[J]. 生态与农村环境学报, 33(3): 242-251.]

CHEN JQ, SUN BY, ZHANG ZR, 1990. Phvsiological effects of different ecotypes of *Spartina alterniflora* imposed by magnetic fields[J]. J Nanjing U, 26(1): 87-95.[陈建群，孙炳寅，张正仁, 1990. 磁场对互花米草(*Spartina alterniflora*)三种生态型的生理效应[J]. 南京大学学报, 26(1): 87-95.]

CIFUENTES LA, COFFINS RB, SOLORZANO L, et al., 1996. Isotopic and elemental variations of carbon and nitrogen in a mangrove estuary[J]. Coast Shelf S, 43(6): 781-800.

DOU YW, LIN MJ, 1991. Division on dynamic areas of susepnded silt in Minjiang River mouth by remote sensing analysis[J]. J Oceanogr Taiwan Strait, 10(2): 150-15. [窦亚伟，林敏基, 1991. 闽江口悬浮泥沙动态分区的遥感分析[J]. 台湾海峡, 10(2) : 48-53.]

FENG Z X, GAO J H, CHEN L, et al., 2015. The response of organic carbon content to biomass dynamics in *Spartina alterniflora* marsh[J]. Acta Ecol Sin, 35(7): 2038-2047. [冯振兴,高建华,陈莲，等, 2015. 互花米草生物量变化对盐沼沉积物有机碳的影响[J]. 生态学报, 35(7): 2038-2047.]

FENG ZX, GAO JH, CHEN L, et al., 2016. Impact of *Spartina alterniflora* biomass variation on content and sources of organic carbon fractions in salt marshes: A case study of tidal salt marsh of Wanggang Estuary, Jiangsu Province[J]. Geochimica,45(1): 87-97. [冯振兴，高建华，陈莲，等, 2016，互花米草生物量变化对盐沼沉积物有机碳组分和来源的影响:以王港河口潮滩为例[J]. 地球化学, 45(1): 87-97.]

GAO JH, YANG GS, OU WX, 2007. The influence after introduction of *Spartina alterniflora* on the distribution of TOC, TN and TP in the national Yancheng rare birds nature reserve, Jiangsu Province, China[J]. Geogr res, (4): 799-808.[高建华,杨桂山,欧维新, 2007，互花米草引种对苏北潮滩湿地 TOC、TN 和 TP 分布的影响[J]. 地理研究, (4): 799-808.]

HAN S, ZHANG HB, XU YT, et al., 2020. Ecological effects of landscape changes under artificial cofferdam and *Spartina alterniflora* expansion in Yancheng coastal wetland[J]. N Hortic, (11): 76-82. [韩爽，张华兵，徐颖彤，等，2020. 人工围堰与互花米草扩张下盐城海滨湿地景观变化的生态效应[J]. 北方园艺，(11): 76-82.]

ZHOU HX , LIU JE, ZHOU J, et al., 2008. Effect of an alien species *Spartina alterniflora* Loisel on biogeochemical processes of intertidal ecosystem in the Jiangsu coastal region, China[J]. Pedosphere, 18(1): 77-85.

XIANG J, LIU DY, DING WX, et al., 2015. Invasion chronosequence of *Spartina alterniflora* on methane emission and organic carbon sequestration in a coastal salt marsh[J]. Atmos Environ,112: 72-80.

JIANG N, 2019. Analysis on the evolution trend of red tide in the Beibu Gulf of Guangxi and its prevention and control ideas[J]. Mar Dev Manage, 36(11): 82-85. [姜宁, 2019. 广西北部湾海域赤潮演变趋势分析及其防控思路[J]. 海洋开发与管理, 36(11): 82-85.]

JIN BS, YAN HY, ZHANG LH, et al., 2016. Spatial-temporal variations and theirs influence factors of soil organic carbon under the *Spartina alterniflora* wetland in China[J]. Ecol Environ Sci, 25(12): 2021-2027. [金宝石，闫鸿远，张林海，等，2016. 中国滨海互花米草湿地土壤有机碳时空变化及其影响因素[J]. 生态环境学报, 25(12): 2021-2027.]

KRISHNAMURTHY RV, BHATTACHARYA SK, KUSUMGAR S, 1986. Palaeoclimatic changes deduced from $^{13}C/^{12}C$ and C/N ratios of Karewa Lake sediments, India[J]. Nature, 323(6084): 150-152.

LI X, LIU MS, 2020. Correspondence analysis of plant patches and soil factors in mosaic community of beach wetland[J]. J Zhejiang Agric Sci, 61(10): 2163-2168 .[李想，刘茂松, 2020. 滩涂湿地镶嵌群落植物斑块与土壤因子对应分析[J]. 浙江农业科学, 61(10): 2163-2168.]

LUAN ZQ, YAN DD, XUE YY, et al., 2020. Research progress on the ecohydrological mechanisms of *Spartina alterniflora* invasion in coastal wetlands[J]. J Agric Res Environ, 37(4): 469-476. [栾兆擎，闫丹丹，薛媛媛，等, 2020. 滨海湿地互花米草入侵的生态水文学机制研究进展[J]. 农业资源与环境学报, 37(4): 469-476.]

PAN LH, 2011. Study on biomass of *Cyperus malaccensis* Lam at Maoweihai in Guangxi[J]. J Anhui Agric Sci, 39(22): 13481-13483. [潘良浩, 2011. 广西茅尾海茳芏生物量研究[J]. 安徽农业科学, 39(22): 13481-13483.]

PAN LH, SHI XF, TAO YCH, et al., 2016. Distribution and expansion of *Spartina alterniflora* in coastal tidal zone, Guangxi[J]. Wetl Sci, 14(4): 464-470. [潘良浩，史小芳，陶艳成，等, 2016, 广西海岸互花米草分布现状及扩散研究[J].湿地科学, 14(4): 464-470.]

PAN T, ZENG LF, ZENG CS, et al., 2015. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil organic carbon in the bare tidal flat wetland of Minjiang River estuary[J]. Sci Soil Water Conserv,13(1): 84-90.[潘婷，曾六福，曾从盛，等, 2015. 互花米草入侵对闽江河口裸滩湿地土壤有机碳的影响[J]. 中国水土保持科学, 13(1): 84-90.]

QIN P, XIE M ,WANG CY, et al., 1992. Study on the application of rice grass[M]. Beijing: Ocean Press：42-45. [钦佩，谢明，王长永，等, 1992. 米草的应用研究[M]. 北京：海洋出版社：42-45.]

SHEN YM, WANG YF, CHEN SJ, et al., 2013. The temporal and spatial distributions of the macrobenthos in *Spartina alterniflora* salt marsh[J]. Geogr Res, 32(4): 638-644.[沈永明，王艳芳，陈寿军，等, 2013. 互花米草盐沼湿地大型底栖动物时空分布特征[J]. 地理研究, 32(4): 638-644.]

SUN F, YAN SW, LIN YM, et al., 2017. Distribution characteristics of soil organic carbon storage and carbon density from damaged vegetation under different climate types in Wenchuan earthquake region[J]. Guihaia,37(12): 198-1507. [孙凡，严思维，林勇明，等, 2017. 汶川震区不同气候区受损植被土壤有机碳储量和碳密度分布特征[J]. 广西植物, 37(12): 1498-1507.]

TAO YH, HUANG X, WANG XP, et al., 2020. Soil carbon and nitrogen storages in three mangrove stands of Zhenzhu Gulf, Guangxi[J]. Guihaia, 40(3):285-292. [陶玉华，黄星，王薛平，等, 2020. 广西珍珠湾三种红树林林分土壤碳氮储量的研究[J]. 广西植物, 40(3): 285-292.]

TONG XL, SUN ZG, CHEN BB, et al., 2020. Organic Sulfur Mineralization Characteristics of Soils in *Spartina alterniflora* Distribution Areas in Shanyutan of the Min River Estuary in Winter 2018[J]. Wetl Sci, 18(5): 613-622. [童晓雨，孙志高，陈冰冰，等,2020. 年冬季闽江河口鳝鱼滩湿地互花米草分布区土壤有机硫矿化特征[J]. 湿地科学, 18(5): 613-622.]

TONG XY, SUN ZG, ZENG AY, et al., 2019. Effects of *Spartina alterniflora* invasion in a seaward direction on variations of inorganic sul-fur forms in marsh soils of the Minjiang River estuary[J]. Chin J Appl Ecol, 30(10): 3518-3526. [童晓雨，孙志高，曾阿莹，等, 2019. 闽江河口互花米草海向入侵对湿地土壤无机硫赋存形态的影响[J]. 应用生态学报, 30(10): 3518-3526.]

TONG XL, SUN ZG, CHEN BB, et al., 2020. Organic sulfur mineralization characteristics of Soils in *Spartina alterniflora* distribution areas in Shanyutan of the Min River Estua ry in winter 2018[J]. Wetl Sci, 18(5): 613-622. [童晓雨，孙志高，陈冰冰，等, 2020. 年

冬季闽江河口鳝鱼滩湿地互花米草分布区土壤有机硫矿化特征[J]. 湿地科学, 18(5): 613-622.]

WANG D, ZHANG R, XIONG J, et al., 2015. Contribution of invasive species *Spartina alterniflora* to soil organic carbon pool in coastal wetland:Stable isotope approach[J]. Chinese J Plant Ecol, 39(10): 941-949. [王丹, 张荣, 熊俊, 等, 2015. 互花米草入侵对滨海湿地土壤碳库的贡献--基于稳定同位素的研究[J]. 植物生态学报, 39(10): 941-949.]

WANG FY, ZHANG JC, CAO Y, et al., 2020. Ecological risk assessment of *Spartina alterniflora* invasion in coastal wetlands of eastern Fujian[J]. J For Environ, 40(6): 579-587. [王方怡, 张嘉诚, 曹彦, 等, 2020. 闽东滨海湿地互花米草入侵生态风险评价[J]. 森林与环境学报, 40(6): 579-587.]

WANG G, YANG WB, WANG GX, et al., 2013. The effects of *Spartina alterniflora* seaward invasion on soil organic carbon fractions, sources and distribution[J]. Acta Ecol Sin, 33(8): 2474-2483. [王刚, 杨文斌, 王国祥等, 2013. 互花米草海向入侵对土壤有机碳组分、来源和分布的影响[J]. 生态学报, 33(8): 2474-2483.]

XIE BH, HAN GX, 2018. Control of invasive *Spartina alterniflora*：A review[J]. Chin J Appl Ecol, 29(10): 3464-3476. [谢宝华, 韩广轩, 2018, 外来入侵种互花米草防治研究进展[J]. 应用生态学报, 29(10): 3464-3476.]

XIE RR, WU RL, TANG C, et al., 2020. Heavy metal accumulation affected by *Spartina alterniflora* invasion in estuarine wetland sediments[J]. J Nat Res, 35(5): 1238-1249. [谢蓉蓉, 吴如林, 唐晨, 等, 2020. 互花米草入侵对河口湿地沉积物重金属累积效应[J]. 自然资源学报, 35(5): 1238-1249.

XU X, WANG H, ZHAO YF, et al., 2014. The characteristics of surficial sediments organic carbon in Yancheng Coastal Wetland[J]. J Nat Res, 29(11): 1957-1967. [许鑫,王豪, 赵一飞, 等, 2014. 盐城滨海湿地表层沉积物有机碳特征[J]. 自然资源学报, 29(11): 1957-1967.]

XU YW, LIAO BW, JIANG ZM, et al., 2020. Contents of organic carbon in soils of Mangrove forest, *Spartina alterniflora* marsh and bare flat in Qi'ao island, Zhuhai and their influencing factors[J]. Wetl Sci, 18(1): 85-90. [徐耀文, 廖宝文, 姜仲茂, 等, 2020. 珠海淇澳岛红树林、互花米草沼泽和光滩土壤有机碳含量及其影响因素[J]. 湿地科学, 18(1): 85-90.]

YANG SL, XU KH, MILLIMAN JD, et al., 2015. Decline of Yangtze River Water and Sediment Discharge: Impact From Natural and Anthropogenic Changes[J]. Sci Rep, 5: 12581.

YIN XL, CHEN GX, WANG C, et al., 2020. Effects of *Spartina alterniflora* invasion on soil fungi community structure and diversity in estuarine wetland[J]. Acta Sci Circum, 40(6): 2186-2194.[尹晓雷, 陈桂香, 王纯, 等, 2020. 互花米草入侵对河口湿地土壤真菌群落结构及多样性影响[J]. 环境科学学报, 40(6): 2186-2194.]

YU CF, CHEN PF, LIU CA, et al., 2014. Research Progress on carbon storage and carbon sink of *Spartina alterniflora* wetland[J]. Mar Dev Managet, 31(8): 85-89. [于彩芬, 陈鹏飞, 刘长安, 等, 2014. 互花米草湿地碳储量及碳汇研究进展[J]. 海洋开发与管理, 31(8): 85-89.]

ZHAO MX, LI DZ, PAN Y, et al., 2012. Ecological stoichiometrical analysis on the strategies ofutilization of nitrogen and phosphorus in *Phragmites australis* and *Spartina alterniflora* in Chongming Dongtan wetland[J]. Guihaia, 32(6): 715-722. [赵美霞, 李德志, 潘宇, 等, 2012. 崇明东滩湿地芦苇和互花米草 N、P 利用策略的生态化学计量学分析[J]. 广西植物, 32(6): 715-722.]

ZHAO XJ, LI JS, LIU XY, et al., 2017. Combined effects of mowing and shading on growth and survival of *Spartina alterniflora*[J]. Guihaia, 37(3): 303-307. [赵相健，李俊生，柳晓燕，等，

2017. 刈割加遮荫对互花米草生长和存活的影响[J]. 广西植物，37(3)：303-307.]
ZUO XY, DOU ZG, CAI Y, et al., 2019. Functional traits of dominant plants in coastal wetland of Yancheng City, Jiangsu Province[J]. Wetl Sci Manage, 15(3): 59-62. [左雪燕，窦志国，蔡杨，等, 2019. 江苏盐城滨海湿地优势植物功能性状分析[J]. 湿地科学与管理, 15(3): 59-62.]